文章编号:1000-4939(2023)06-1335-08

微波作用对砂岩物理力学性质影响的试验

姚华彦[1],姚家李[1],方琦[1],潘鹏志[2],鲁建国[1],管瑞东[1]

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院,230009 合肥;2. 中国科学院武汉岩土力学研究所,430071 武汉)

摘 要:对微波作用后的砂岩试样开展了波速测试和单轴压缩试验,并结合差热分析和扫描电镜试验探讨了微波加热对砂岩物理力学性质的影响机制。试验表明:在微波作用下试样温度迅速升高,且功率越大,升温速率越大;微波作用后,试样纵波波速随着微波加热功率、时间的增大迅速降低;随着微波功率的增加,试样的单轴抗压强度和弹性模量先增大后减小;随着加热时间的增加,试样的单轴抗压强度先增加后减小,弹性模量则都降低。微波加热导致砂岩内部产生了不同程度的结构变化,表现为黏土矿物的失水收缩裂纹、沿颗粒边界裂纹、颗粒内部裂纹等。低功率、短时间加热时,微波加热对砂岩的强度有增强作用;高功率且长时间微波加热条件下,砂岩试样温度较高并产生明显损伤,使得强度降低。

关键词:微波;力学特性;波速;扫描电镜;微裂纹

中图分类号:TU45 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.06.014

Experimental study on the effect of microwave on the physical and mechanical properties of sandstone

YAO Huayan[1], YAO Jiali[1], FANG Qi[1], PAN Pengzhi[2], LU Jianguo[1], GUAN Ruidong[1]

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, 230009 Hefei, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 430071 Wuhan, China)

Abstract: In order to study the law of physical and mechanical properties of rock under microwave heating, the wave velocity test and uniaxial compression test were carried out on the sandstone samples heated by microwave. The influence mechanism of microwave heating on mechanical properties of rock was investigated combined with DTG and SEM. The results show that the temperature of sandstone increased rapidly under the action of microwave, and the heating rate increased with the increase of microwave power. Under the action of microwave, the wave velocity decreased rapidly with the increase of microwave power and time. With the increase of microwave power, the peak strength and elastic modulus of sandstone first increased and then decreased. With the increase of heating time, the peak strength first increased and then decreased, and the elastic modulus decreased. Microwave heating led to different degrees of structural changes in sandstone, such as water loss shrinkage crack of clay mineral, crack along particle boundary,

收稿日期:2021-10-25 **修回日期**:2022-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52125903)

通信作者:姚华彦,副教授。E-mail:yaohuayan@hfut.edu.cn

引用格式:姚华彦,姚家李,方琦,等. 微波作用对砂岩物理力学性质影响的试验[J]. 应用力学学报,2023,40(6):1335-1342.

YAO Huayan, YAO Jiali, FANG Qi, et al. Experimental study on the effect of microwave on the physical and mechanical properties of sandstone[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(6):1335-1342.

and crack inside particle. Under low power and short time heating, microwave heating can enhance the strength of sandstone. Under the condition of high power and long-time microwave heating, the sandstone sample has high temperature and obvious damage, which reduces the strength.

Key words: microwave; mechanical property; wave velocity; scanning electron microscope; microcrack

目前,钻爆法与机械破岩法依旧是最常用的破岩方法[1]。其中机械破岩的刀具磨损是破碎岩石过程中面临的主要问题[2]。微波加热由于其选择性快速加热、整体加热等特点,能够显著降低岩石强度,被认为是一种非常有潜力的辅助破岩技术[3-5]。

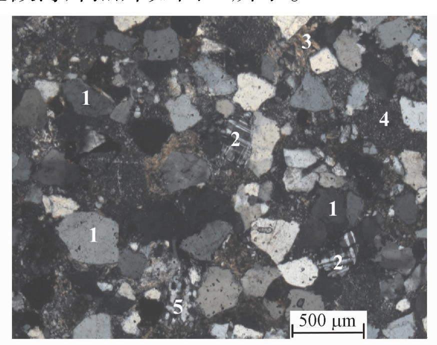
近年来,国内外专家对微波加热破岩进行了大量的试验和理论研究。文献[6-7]研究了微波加热下玄武岩、花岗岩和砂岩的热物理特性,探讨了干燥和饱水岩石在微波加热下单轴抗压强度和波速的变化规律。文献[8-12]通过数值模拟的手段研究微波作用下岩石的温升特性以及破碎机理,并探讨了影响微波破岩效果的多种因素。文献[13]对 11 种常见主要造岩矿物进行了微波加热试验,并将矿物按微波吸收能力分为强、中等以及弱微波吸收 3 类,可根据岩石的矿物成分判断岩石的微波敏感性。文献[14]主要研究了不同微波加热路径下玄武岩的破裂损伤机制和升温特性。文献[15-16]重点讨论了微波加热对岩石表面温度和穿透深度的影响。文献[17]从微观角度研究了微波加热对致密砂岩的影响,重点分析了砂岩孔隙率、渗透率以及微观孔隙结构的变化。文献[18]利用电镜扫描试验从微观角度重点探讨了微波加热下砂岩内部微观结构变化、微裂缝产生机理及特征。文献[19]基于热力学定律及相关断裂理论,建立微波照射下均匀脆性岩石裂纹扩展的力学模型,深入探究微波照射导致的岩石热致断裂机制。

不同类型岩石对微波敏感性存在较大差异,微波辐射对岩石损伤的过程和机制也不一致。本研究以砂岩为研究对象,采用工业微波炉对其进行微波处理,通过微波加热条件下砂岩的温升规律以及波速和单轴压缩力学性质的变化,研究微波加热对砂岩的物理力学性质的影响,并结合电镜扫描和热重等试验,分析微波作用对砂岩物理力学性质的影响机制。

1 岩石材料及试验方法

1.1 岩石试样

砂岩试样为灰色,中砂级碎屑结构,碎屑颗粒约占 90%,填隙物为黏土矿物,约占 10%。各矿物中石英占 65%、长石占 20%、白云母占 5%,黏土矿物和不透明铁质矿物占 10%,其中黏土矿物为高岭石,其显微薄片照片如图 1 所示。



1-石英; 2-长石; 3-白云母; 4-燧石岩屑; 5-石英岩岩屑

图 1 砂岩正交偏光显微镜照片(×50)

Fig. 1 Analysis of sandstone by positive polarizing microscope (×50)

砂岩试样的制备标准按照国际岩石力学与岩石工程学会(International Society for Rock Mehanics and Rock Engineering, ISRM)建议的实验室规范要求,通过切割、打磨加工成直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱试样。为避免试样含水率对试验的影响,试验前对各岩石试样在烘箱里以 110 ℃的温度烘干24 h,并将试样置于干燥皿中冷却至室温再开展试验。

1.2 试验方法

微波加热试验仪器采用 CM-06S 型多模谐振腔工业微波炉(图 2),微波频率为 2.45 GHz,功率为 0 ~ 6 kW可调。温度测量采用手持红外测温仪对加热后的试样进行温度测量。



图 2 工业微波炉

Fig. 2 Industrial microwave oven

微波加热前对所有试样进行波速测试,剔除波

速差别较大的试样。本次试验分别以微波功率和时间作为变量,开展 2 组微波加热试验:第 1 组试样采用微波功率分别为 2、4、6 kW 加热 4 min;第 2 组试样采用 5 kW 功率分别加热 2、6、8 min。待试样自然冷却至室温后再对其分别进行波速测试,然后以 0.06 mm/min 的加载速率进行单轴压缩试验,直至试样破坏,记录应力、应变等相关试验数据。

为保证单位体积的岩石在相同时间内吸收同等的微波能量,每一次只加热一个圆柱试样。所有试样在微波加热后,立即用手持式红外测温仪测量试样表面最高温度。

此外,为了探讨微波作用对砂岩物理力学性质影响的微细观机制,还对砂岩样品进行热重测试,并开展 SEM 电镜扫描试验,观察微波作用对砂岩微观结构的影响。

2　试验结果及分析

2.1　微波作用前后试样温度及形貌变化

经过不同参数的微波加热后,通过手持红外测温仪测量试样表面最大温度,其结果如表 1 所示。可以看出,在微波作用下,砂岩试样的表面温度迅速上升,并且微波功率越大,升温速率越大,试样的表面温度越高。随着加热时间的增加,试样表面温度快速升高,随后加热速率逐渐降低。

砂岩在微波加热后,其形貌发生明显变化,微波加热前后的砂岩试样如图 3 所示。未经微波加热的砂岩整体呈现为灰白色,而经微波加热后,试样表面部分出现明显焦黑色,在 6 kW 加热 4 min 后,整个试样表面全部变成焦黑色;在 5 kW 加热 8 min 后,不仅岩样的颜色变黑,还出现宏观可见裂纹。砂岩微波过后颜色变黑,是由于砂岩为沉积岩,在形成的过程中会掺杂一些有机物质,在微波加热中,有机物会在升温过程中碳化,从而表现出黑色。在大功率长时间微波加热中,试样内各矿物成分由于不均匀热膨胀产生的热应力,导致试样产生宏观裂纹。

表 1　微波加热前后砂岩温度变化

Tab. 1　Temperature change of sandstone before and after microwave irradiation

编号	微波参数	温度/℃	均值/℃
B-1	2 kW,4 min	256.8	250.4
B-2		244.5	
B-3		249.8	
C-1	4 kW,4 min	318.6	345.2
C-2		356.6	
C-3		360.5	
D-1	6 kW,4 min	429.7	438.8
D-2		436.5	
D-3		450.3	
E2-1	5 kW,2 min	224.8	233.2
E2-2		241.5	
E6-1	5 kW,6 min	441.5	437.9
E6-2		434.3	
E8-1	5 kW,8 min	514.3	497.6
E8-2		480.9	

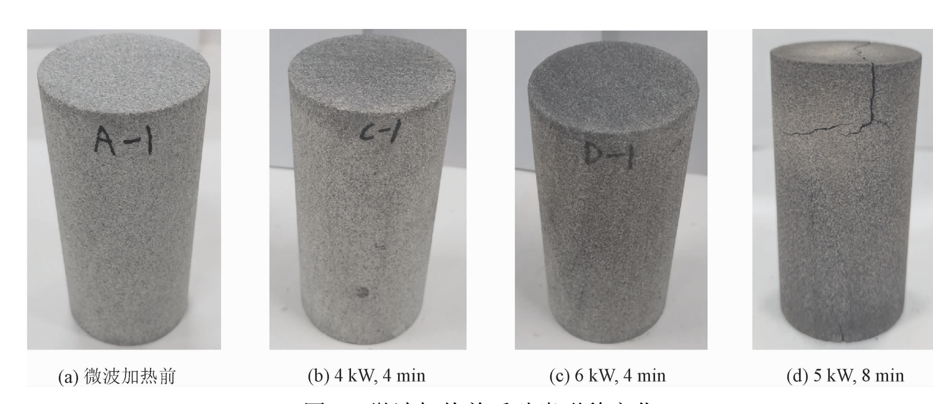


图 3　微波加热前后砂岩形貌变化

Fig. 3　Morphological changes of sandstone before and after microwave irradiation

2.2　微波作用前后波速变化规律

超声波在岩石中的传播速率受到岩石类型、含水率以及内部孔隙结构等多种因素的影响,对于同一个岩石试样而言,其纵波波速的大小主要受岩样内部孔隙结构的影响。通过测试得到试样微波加热

前后的波速如表2所示。

表2 微波加热前后砂岩波速变化

Tab.2 Variation of wave velocity of sandstone before and after microwave irradiation

编号	微波参数	波速/(m·s^{-1})	
		微波作用前	微波作用后
A-1	0 kW,0 min	3 340	–
A-2		3 360	–
A-3		3 370	–
B-1	2 kW,4 min	3 370	3 050
B-2		3 390	3 200
B-3		3 390	3 140
C-1	4 kW,4 min	3 400	3 010
C-2		3 410	2 880
C-3		3 410	2 850
D-1	6 kW,4 min	3 440	2 940
D-2		3 440	2 900
D-3		3 440	2 900
E2-1	5 kW,2 min	3 200	3 040
E2-2		3 250	3 000
E6-1	5 kW,6 min	3 230	2 650
E6-2		3 300	2 690
E8-1	5 kW,8 min	3 310	1 770
E8-2		3 310	2 770

由表2可以发现,在相同的作用时间下,随着微波功率从2 kW增大至4 kW,砂岩波速迅速降低;从4 kW增大至6 kW,砂岩波速降低不明显。与未微波加热的试样波速均值比较,经历2、4、6 kW微波加热后试样纵波波速平均降幅依次为7.49%、14.48%和15.31%。

在5 kW微波功率下,随着时间从2 min到6 min,砂岩波速降低率从6.36%增长至18.22%,初期增长迅速,而后逐渐趋于平缓。但在微波8 min后,试样出现宏观裂纹,波速急剧降低,降幅为32.53%。

波速变化通常反映了岩石微观结构变化,上述结果表明微波加热导致砂岩产生了不同程度的结构变化,如形成微观裂纹、结合水蒸发形成新孔隙等。

2.3 微波作用前后砂岩单轴压缩试验结果分析

单轴压缩试验如图4所示。单轴抗压强度通过式(1)进行计算。弹性模量按轴向应力-应变曲线直线段的斜率计算。最后得到的原始试样以及经历微波加热后的砂岩试样的力学参数如表3所示。

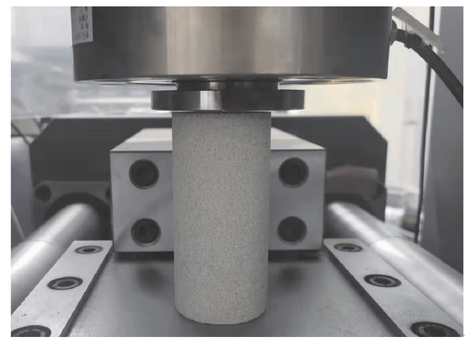


图4 单轴压缩试验图

Fig.4 Uniaxial compression test diagram

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

式中:P为破坏荷载(kN);A为试样横截面积(mm^2)。

表3 微波加热前后砂岩单轴压缩试验结果

Tab.3 Uniaxial compression test results of sandstone before and after microwave irradiation

编号	微波参数	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa
A-1	0 kW,0 min	55.05	10.56
A-2		58.01	10.95
A-3		60.15	10.53
B-1	2 kW,4 min	61.78	10.99
B-2		60.96	10.82
B-3		66.62	11.02
C-1	4 kW,4 min	66.67	12.07
C-2		64.48	11.46
C-3		67.38	11.33
D-1	6 kW,4 min	63.31	10.09
D-2		63.51	10.47
D-3		59.79	10.09
E2-1	5 kW,2 min	60.60	10.10
E2-2		62.21	10.30
E6-1	5 kW,6 min	62.84	10.00
E6-2		63.83	10.30
E8-1	5 kW,8 min	50.44	6.90
E8-2		55.00	8.71

2.3.1 微波对砂岩峰值强度的影响

砂岩单轴压缩强度与微波功率和微波时间的关系分别如图5和图6所示。

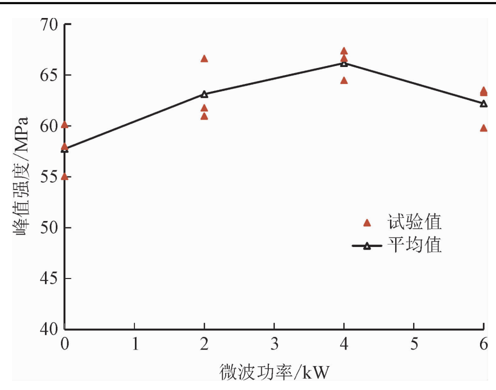


图 5　峰值强度与微波功率的关系

Fig. 5　Relationship between peak strength and microwave power

从图 5 与图 6 中可以看出，在不同微波功率和时间作用下，砂岩的单轴抗压强度呈现出相同的变化趋势，即强度先增加后降低。

图 5 可以看出，在微波时间为 4 min 时，砂岩的峰值强度随着微波功率的增大先是出现上升趋势，并在 4 kW 功率时达到最大，之后出现下降趋势。与未微波加热试样的均值相比，经历 2、4、6 kW 微波加热后，试样平均峰值强度增幅为 9.32%、14.61% 和 7.73%。6 kW 加热后的试样峰值强度虽然开始出现下降，但仍高于未加热试样的强度。

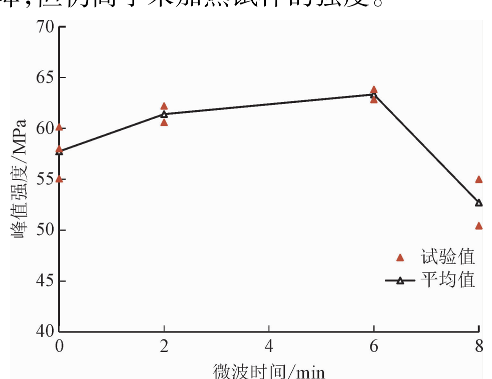


图 6　峰值强度与微波时间的关系

Fig. 6　Relationship between peak strength and microwave time

图 6 可以看出，在微波功率为 5 kW 时，砂岩的峰值强度随着微波时间的增加先上升后下降。与未微波加热试样的均值相比，经历 2、6 min 微波加热后，试样平均峰值强度增幅分别为 6.35% 和 9.69%，经过 8 min 加热后，试样表面出现宏观裂纹，强度与未加热试样相比降低 8.69%。

已有的一些研究成果表明，微波作用通常会使岩石强度明显降低。文献[20-21]中玄武岩和文献[22]中花岗岩，微波在短时间的辐射之后即导致岩石显著损伤（例如玄武岩在 5 kW 功率下加热 20 s 即出现贯穿试样的裂纹），其抗压强度均表现为不同程度的降低。而本研究的砂岩与上述玄武岩、花岗岩的情况存在明显差异，表现出不同的规律，即：当加热时间一定时，随着加热功率的增大，单轴抗压强度先增大后减小；当微波功率一定时，随着加热时间的增加，单轴抗压强度也是先增大后减小。微波加热在功率较小或短时间内并不能对砂岩产生显著的损伤，相反的，还对砂岩的强度有增强作用，与高温对砂岩强度的影响规律基本类似[23-24]。只有当功率较大且加热时间较长时，才会导致岩石强度相对原始状态有显著降低（图 6 中 5 kW 加热 8 min 的情况）。

产生这种现象的原因与本研究所用砂岩特性和成分有关。砂岩是沉积岩，与现有其他文献的花岗岩、玄武岩的结晶联结不同，砂岩颗粒间为胶结联结。并且本研究试验的砂岩主要矿物为石英、长石、白云母等，各矿物对微波敏感性较弱[13]，在低功率短时间微波加热后，各矿物温度较低，不同矿物之间的温差不大，不会对岩样造成较大损伤；而组成砂岩的矿物颗粒因内部结合水挥发，摩擦特性得以增强，胶结物也会结合水流失而强度增强，因此导致了抗压强度的增大。而当高功率长时间微波加热后，砂岩矿物颗粒间的热应力逐渐增大，不均匀膨胀使得岩石内部产生新的裂隙，从而导致砂岩的强度降低。

2.3.2　微波对砂岩弹性模量的影响

砂岩的弹性模量与微波功率和微波时间的关系如图 7 和图 8 所示。

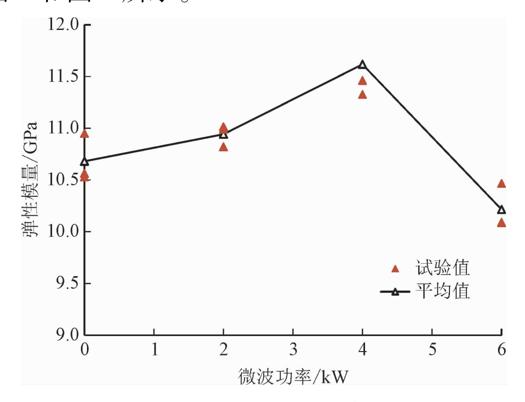


图 7　弹性模量与微波功率的关系

Fig. 7　Relationship between elastic modulus and microwave power

由图 7 可以看出，砂岩的弹性模量随微波功率的变化规律与峰值强度的变化规律类似，整体趋势为先上升后下降的变化，并且都在 4 kW 功率下达到最大值。与未经微波加热试样的均值相比，经历 2、4、6 kW 微波加热后，试样的平均弹性模量增幅分别为 2.45%、8.78% 和 −3.74%。这与上述微波加热对单轴抗压强度的影响类似。

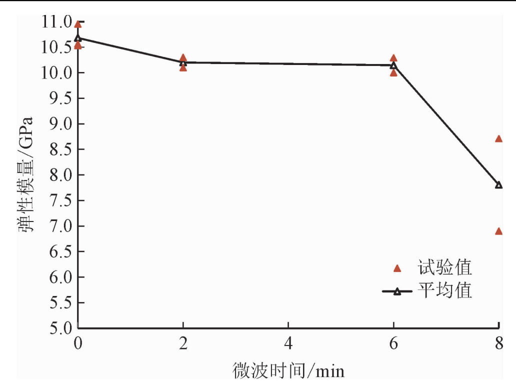


图 8 弹性模量与微波时间的关系

Fig. 8 Relationship between elastic modulus and microwave time

由图 8 可以看出,在功率 5 kW 加热后,砂岩的弹性模量随着加热时间的增加而降低。在短时间微波加热后弹性模量降低不明显,长时间微波加热后才出现显著降低。与未微波加热试样的均值相比,经历 2、6、8 min 微波加热后,试样的平均弹性模量降低幅度分别为 4.49%、5.01% 和 26.92%。

3 微波对砂岩物理力学性质影响机理分析

微波作用下砂岩温度快速升高,微波对岩石造成的损伤主要是由于温度引起的。为了研究微波对砂岩的热损伤机理,通过同步热分析仪对砂岩试样进行热重-热差测试,对微波前后的砂岩进行了 SEM 电镜扫描试验分析。

砂岩试样微分热重(derivative thermogravimetry, DTG)和质量变化曲线如图 9 所示。可以看到,在 25 ~ 800 ℃之间,砂岩的质量变化曲线整体呈下降趋势,其快速下降阶段位于 400 ~ 800 ℃区间,质量损失为 3.42%。前述矿物鉴定表明,本试验所用砂岩主要矿物包括石英、长石、白云母、高岭石等。其中石英在 573 ℃由 α 相逐渐向 β 相转换[25];白云母在 750 ℃开始产生结构水损失[26];高岭石在470 ℃开始先后脱去层间水和结构水,并随温度升高结构破坏,逐步形成偏高岭石[27-28];而长石通常较为稳定,当温度达到1 000 ℃才发生熔融等变化[29]。上述试验中砂岩试样的最高表面温度为 514.3 ℃,可初步判断在此次试验过程中,砂岩主要为高岭石脱去结构水,发生结构变化。

由扫描电镜试验可获得砂岩内部微观结构如图 10 所示。可以明显地看出,在高功率、长时间微波加热下,砂岩试样内部微裂纹相较于低功率、短时间明显增多,表现为黏土矿物的失水收缩裂纹(图 10c)、沿颗粒边界裂纹(图 10d)和穿过颗粒裂纹(图 10e)。

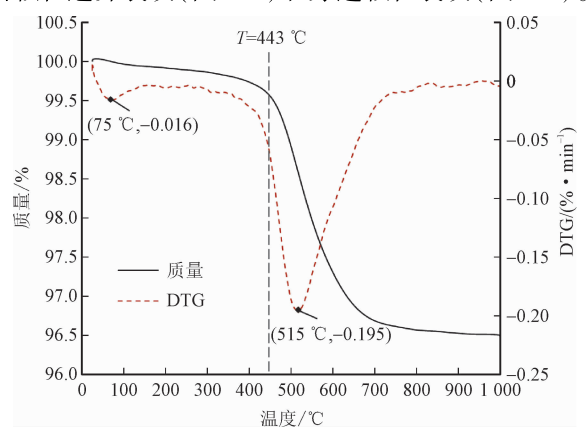


图 9 砂岩热重曲线

Fig. 9 DTG curve of sandstone

本试验中的砂岩颗粒主要成分有石英、长石和白云母,填隙物为黏土矿物和不透明铁质矿物,黏土矿物主要为高岭石。微波快速加热时,黏土矿物在一定温度下会失去层间水和结合水,体积收缩形成裂纹。此外由于造岩矿物的介电特性和热膨胀系数各不相同,各矿物对微波的吸收能力不同,造成颗粒与颗粒之间、颗粒与填隙物之间变形不一致而容易形成裂纹。颗粒内部裂纹的产生主要与岩石颗粒内部矿物组成的非均质性以及颗粒内的弱势面有关。由于各种矿物成分具有不同的介电系数和热膨胀系数,微波对砂岩试样中各造岩矿物进行选择性加热,造成岩样内各处升温速率不同,各成岩矿物发生非均匀膨胀而产生热应力,最终导致砂岩颗粒内部破坏产生裂纹。

在低功率短时间条件下,矿物颗粒的温度较低,其受热产生的不均匀膨胀变形较小,产生的不均匀应力较小,不容易生成新的裂纹,如图 10(a)、10(b)所示,在 4 kW 加热 4 min 之后,砂岩内部没有明显的裂纹。在微波加热过程中,组成砂岩的矿物颗粒因失水摩擦特性得以增强,胶结物也因失水而强度增强,试样的承载能力得以强化。

而当微波参数进一步增大,达到 6 kW、4 min 和 5 kW、8 min 时,砂岩的温度进一步升高,试样温度已经超过 400 ℃。由图 9 可知,温度超过 400 ℃后砂岩进入失重阶段,尤其在 443 ℃之后快速失重,砂岩中的矿物成分可能因高温导致相变或结构的变化[25-26],使得试样内部产生大量新的显著微裂隙(图 10c ~ 10f),从而导致其峰值强度、弹性模量等开始有所下降。

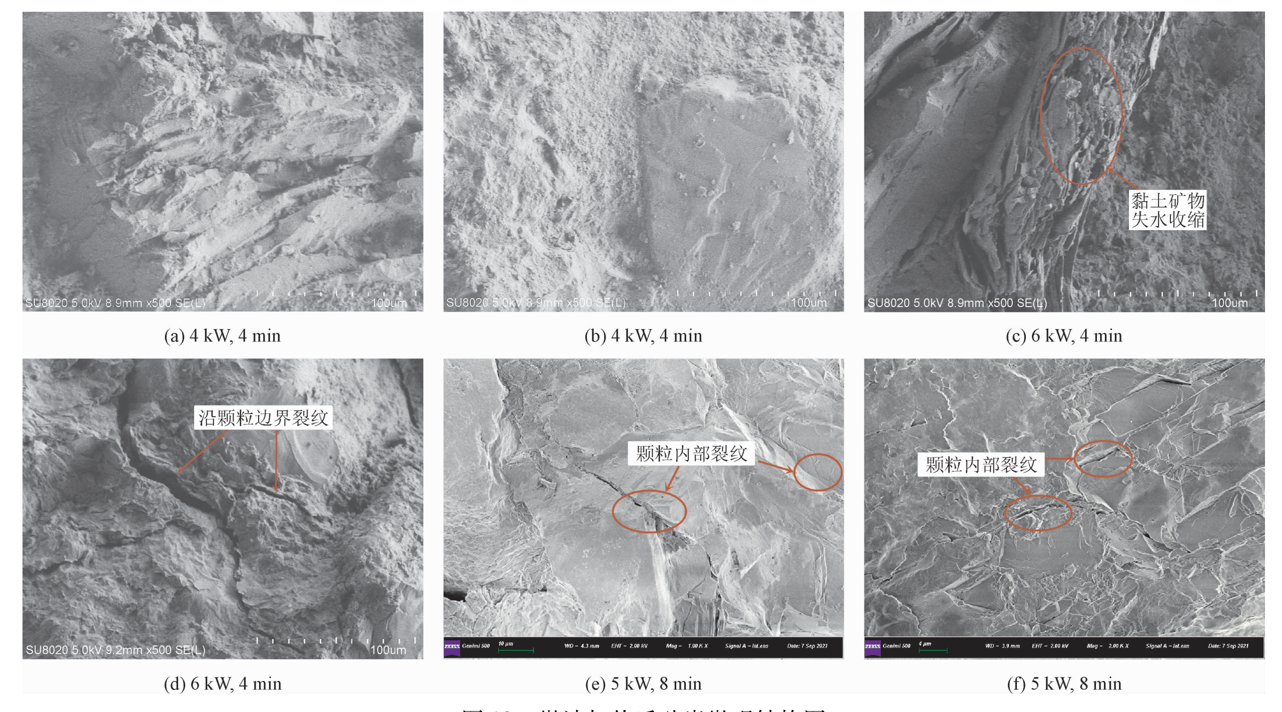


图 10　微波加热后砂岩微观结构图

Fig. 10　Microstructure of sandstone after microwave irradiation

4　结　论

本研究通过对砂岩进行微波加热试验,获得了砂岩在不同微波作用参数下物理力学性质的变化规律,并结合热重分析和 SEM 试验,探讨微波作用对砂岩物理力学性质影响的微细观机制。

1) 砂岩在微波作用下,试样温度迅速升高,表面出现明显的焦黑色。微波功率越大,试样的升温速率越大。加热时间越长,其升温幅度逐渐减小。

2) 在微波加热之后,砂岩的波速迅速降低。随着微波加热功率和时间的增加,波速降低幅度越大。

3)加热时间相同时,砂岩的单轴抗压强度随着微波功率增大先增加后降低;加热功率相同时,砂岩的单轴抗压强度随着时间增加也是先增加后降低。低功率短时间条件下微波对砂岩强度有明显的强化作用,其单轴抗压强度比原始试样强度更高。当微波功率达到 5 kW,加热 8 min 时,砂岩试样温度更高,产生宏观裂纹,强度迅速降低并小于原始试样的单轴抗压强度。

4)砂岩弹性模量随着微波功率增大先增加后降低,随着加热时间增加而降低;功低功率短时间时弹性模量的变化幅度都较小,当微波功率达到 5 kW 并加热 8 min 时弹性模量显著降低。

5)微波加热导致砂岩内部产生了不同程度的结构变化,表现为黏土矿物的失水收缩裂纹、沿颗粒边界裂纹、颗粒内部裂纹等。功率低、加热时间短时,微波加热对砂岩的强度有增强作用;高功率、长时间微波加热条件下,砂岩试样形成宏观裂纹才对强度有显著劣化影响。本研究只考虑了干燥砂岩,是特性条件下的一种讨论。在实际工程中,岩石都含有一定水分,其在微波加热下的响应规律还需要进一步开展试验分析和讨论。

参考文献:

[1]　李夕兵,周子龙,王卫华. 岩石破碎工程发展现状与展望[C]//2009-2010 岩石力学与岩石工程学科发展报告. 北京:中国科学技术出版社,2010:152-159.

[2]　卢高明,李元辉,HASSANI F,等. 微波辅助机械破岩试验和理论研究进展[J]. 岩土工程学报,2016,38(8):1497-1506.
LU Gaoming,LI Yuanhui,HASSANI F,et al. Review of theoretical and experimental studies on mechanical rock fragmentation using microwave-assisted approach[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2016,38(8):1497-1506(in Chinese).

[3]　HAQUE K E. Microwave energy for mineral treatment processes:A brief review[J]. International journal of mineral processing,1999,57(1):1-24.

[4]　WALKIEWICZ J W,CLARK A E,MCGILL S L. Microwave-assisted grinding[J]. IEEE transactions on industry applications,1991,27(2):239-243.

[5]　WHITTLES D N,KINGMAN S W,REDDISH D J. Application of numerical modelling for prediction of the influence of power density on microwave-assisted breakage[J]. International journal of mineral processing,2003,68(1/2/3/4):71-91.

[6] HARTLIEB P,TOIFL M,KUCHAR F,et al. Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution[J]. Minerals engineering,2016,91:34-41.
[7] PEINSITT T,KUCHAR F,HARTLIEB P,et al. Microwave heating of dry and water saturated basalt,granite and sandstone[J]. International journal of mining and mineral engineering,2010,2(1):18-29.
[8] TOIFL M,MEISELS R,HARTLIEB P,et al. 3D numerical study on microwave induced stresses in inhomogeneous hard rocks[J]. Minerals engineering,2016,90:29-42.
[9] JONES D A,KINGMAN S W,WHITTLES D N,et al. The influence of microwave energy delivery method on strength reduction in ore samples[J]. Chemical engineering and processing:Process intensification,2007,46(4):291-299.
[10] ALI A Y,BRADSHAW S M. Bonded-particle modelling of microwave-induced damage in ore particles[J]. Minerals engineering,2010,23(10):780-790.
[11] ALI A Y,BRADSHAW S M. Confined particle bed breakage of microwave treated and untreated ores[J]. Minerals engineering,2011,24(14):1625-1630.
[12] MEISELS R,TOIFL M,HARTLIEB P,et al. Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks[J]. International journal of mineral processing,2015,135:40-51.
[13] LU G M,LI Y H,HASSANI F,et al. The influence of microwave irradiation on thermal properties of main rock-forming minerals[J]. Applied thermal engineering,2017,112:1523-1532.
[14] LU G M,FENG X T,LI Y H,et al. Experimental investigation on the effects of microwave treatment on basalt heating,mechanical strength,and fragmentation[J]. Rock mechanics and rock engineering,2019,52(8):2535-2549.
[15] HASSANI F,NEKOOVAGHT P M,GHARIB N. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering,2016,8(1):1-15.
[16] YAO J H,TAO M,ZHAO R,et al. Effect of microwave treatment on thermal properties and structural degradation of red sandstone in rock excavation[J]. Minerals engineering,2021,162:106730.
[17] WANG H C,REZAEE R,SAEEDI A. Preliminary study of improving reservoir quality of tight gas sands in the near wellbore region by microwave heating[J]. Journal of natural gas science and engineering,2016,32:395-406.
[18] 李皋,孟英峰,董兆雄,等.砂岩储集层微波加热产生微裂缝的机理及意义[J].石油勘探与开发,2007,34(1):93-97.
LI Gao,MENG Yingfeng,DONG Zhaoxiong,et al. Mechanisms and significance of microfractures generated by microwave heating in sandstone reservoirs[J]. Petroleum exploration and development,2007,34(1):93-97(in Chinese).
[19] 袁媛,邵珠山.微波照射下脆性岩石裂纹扩展临界条件及断裂过程研究[J].应用力学学报,2020,37(5):2112-2119.
YUAN Yuan,SHAO Zhushan. Research on the criteria of crack propagation and the process of fracture in brittle rocks under microwave irradiation[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2112-2119(in Chinese).
[20] 卢高明,冯夏庭,李元辉,等.多模谐振腔对赤峰玄武岩微波致裂效果研究[J].岩土工程学报,2020,42(6):1115-1124.
LU Gaoming,FENG Xiating,LI Yuanhui,et al. Effect of microwave-induced fracturing of Chifeng basalt by a multi-mode cavity[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2020,42(6):1115-1124(in Chinese).
[21] 李元辉,卢高明,冯夏庭,等.微波加热路径对硬岩破碎效果影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1460-1468.
LI Yuanhui,LU Gaoming,FENG Xiating,et al. The influence of heating path on the effect of hard rock fragmentation using microwave assisted method[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2017,36(6):1460-1468(in Chinese).
[22] 戴俊,王羽亮,李涛.微波照射下花岗岩尺寸效应试验研究[J].中国科技论文,2019,14(10):1045-1049.
DAI Jun,WANG Yuliang,LI Tao. Experimental study on the size effect of granite by microwave irradiation[J]. China sciencepaper,2019,14(10):1045-1049(in Chinese).
[23] 苏承东,韦四江,秦本东,等.高温对细砂岩力学性质影响机制的试验研究[J].岩土力学,2017,38(3):623-630.
SU Chengdong,WEI Sijiang,QIN Bendong,et al. Experimental study of influence mechanism of high temperature on mechanical properties of fine-grained sandstone[J]. Rock and soil mechanics,2017,38(3):623-630(in Chinese).
[24] 尤明庆,苏承东,李小双.损伤岩石试样的力学特性与纵波速度关系研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):458-467.
YOU Mingqing,SU Chengdong,LI Xiaoshuang. Study on relation between mechanical properties and longitudinal wave velocities for damaged rock samples[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2008,27(3):458-467(in Chinese).
[25] 席道瑛.花岗岩中矿物相变的物性特征[J].矿物学报,1994,14(3):223-227.
XI Daoying. Physical characteristics of mineral phase transition in the granite[J]. Acta mineralogica Sinica,1994,14(3):223-227(in Chinese).
[26] 王凝秀,雅菁.云母晶格缺陷与电性能关系的研究[J].绝缘材料,1994(2):26-30.
WANG Ningxiu,YA Jing. Study on the relationship between mica lattice defects and electrical properties[J]. Insulating materials,1994(2):26-30(in Chinese).
[27] 高琼英,张智强.高岭石矿物高温相变过程及其火山灰活性[J].硅酸盐学报,1989,17(6):541-548.
GAO Qiongying,ZHANG Zhiqiang. Study on the structural change in the calcination process of kaolinite and its pozzolanic activity[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,1989,17(6):541-548(in Chinese).
[28] 张智强,袁润章.高岭石脱(OH)过程及其结构变化的研究[J].硅酸盐通报,1993,12(6):37-41.
ZHANG Zhiqiang,YUAN Runzhang. Study on dehydroxylation process of kaolinite and its structural change[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,1993,12(6):37-41(in Chinese).
[29] 马鸿文,苏双青,王芳,等.钾长石分解反应热力学与过程评价[J].现代地质,2007,21(2):426-434.
MA Hongwen,SU Shuangqing,WANG Fang,et al. Potassium feldspar and evaluation of the processes[J]. Geoscience,2007,21(2):426-434(in Chinese).

（编辑 李坤璐）